بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

پاسخ TEC یون‌سپهری به طوفان‌های مغناطیسی و تابش‌های کیهانی کهکشانی در یک چرخهٔ خورشیدی

بنفشه تاجی *، محمدحسین معماریان، مه‌بانو فلامرزی

دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد

b.taji@stu.yazd.ac.ir
memarian@yazd.ac.ir
Mahbanoofalamarzi@stu.yazd.ac.ir

چکیده - فعالیت‌های خورشیدی و تابش‌های کیهانی کهکشانی (GCR) باعث تغییر در رفتار یون‌سپهر و به‌دنبال آن وردسپهر می شوند. فعالیت‌های خورشیدی شامل تشعشعات خورشیدی، لکه‌های خورشیدی، بادهای خورشیدی و طوفان‌های مغناطیسی است. در این پژوهش به بررسی ارتباط بین شاخص طوفان‌های مغناطیسی Kp و تابش‌های کیهانی کهکشانی با محتوای الکترون کل یون‌سپهر (TEC)، که با استفاده از داده‌های GPS در مقیاس جهانی برای سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ به‌دست آمده، پرداخته شده است. با مقایسهٔ این پارامترها مشاهده می‌شود که شاخص طوفان‌های مغناطیسی Kp با TEC رابطه مستقیم، درحالی‌که با تابش‌های کیهانی کهکشانی رابطه عکس دارند. مقایسهٔ این پارامترها نشان می‌دهد که TEC با شاخص طوفان‌های مغناطیسی Kp رابطه‌ای مستقیم و با تابش‌های کیهانی کهکشانی رابطه‌ای عکس دارد.

کلید واژه- تابش‌های کیهانی کهکشانی، شاخص طوفان‌های مغناطیسی، محتوای کلی الکترون.

Ionospheric TEC Response to Magnetic Storms and Galactic Cosmic Rays in a Solar Cycle

Banafsheh Taji*، Mohammad Hossein Memarian، Mahbano Falamarzi

Faculty of Physics, Yazd University
b.taji@stu.yazd.ac.ir
memarian@yazd.ac.ir
Mahbanoofalamarzi@stu.yazd.ac.ir

Abstract- Solar activity and galactic cosmic rays (GCR) change the behavior of the ionosphere and subsequently the troposphere. Solar activities include solar radiation, sunspots, solar winds, and magnetic storms. This study investigates the relationship between Kp magnetic storm index and galactic cosmic rays with total ionosphere electron content (TEC), obtained using global GPS data for ۲۰۱۵, ۲۰۱۶ and ۲۰۱۷. Comparing these parameters, it can be seen that the Kp magnetic storm index is directly related to TEC, while it is inversely related to galactic cosmic rays. Comparison of these parameters shows that TEC is directly related to the Kp magnetic storm index and inversely related to galactic cosmic radiation.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

Keywords-Total electron content, Index of magnetic storms, Galactic cosmic rays.

مقدمه

امروزه، یکی از مسائل اساسی تعیین نقش و تأثیر فعالت‌های خورشیدی بر تغییرات اقلیمی می‌باشد. فعالیت‌های خورشیدی شامل تشعشعات خورشیدی، لکه‌های خورشیدی، بادهای خورشیدی و طوفان‌های مغناطیسی است [۱]. تابش‌های کیهانی، ذراتی با انرژی بالا و دارای سرعتی نزدیک به سرعت نور می‌باشند که اثر عمیقی روی فرایندهای جوی می‌گذارند. تابش‌های کیهانی یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر تغییرات اقلیم می‌باشد که بر تشکیل ابرها تأثیر گذاشته و از این طریق انرژی ورودی خورشید به زمین را کنترل می‌کند [۲]. امروزه تمام چالش‌ها در راستای کاهش سهم عوامل خارجی است که بر روی سامانهٔ اقلیم و وضع هوا تأثیر می‌گذارند. جو فوقانی زمین تابش خورشیدی را جذب می‌کند، که منجر به گرم شدن و یونیزاسیون می‌شود و یون‌سپهر، حاصل از یونیزاسیون فوق فرابنفش (XUV) خورشیدی است. یون‌سپهر لایهٔ پلاسمایی اطراف جو زمین است که حدوداً ارتفاع ۱۰۰۰-۸۰ کیلومتری را به خود اختصاص می‌دهد. یون‌سپهر لایه‌ای ساده و بدون تغییر نیست؛ بلکه به‌طور پیوسته تحت تأثیر خورشید و طوفان‌های خورشیدی، میدان مغناطیسی زمین، طوفان‌های سطح زمین و گردش گرم‌سپهری قرار دارد [۳]. نمایهٔ واقعی چگالی الکترون، با خواص ویژهٔ جذب اجزای گاز جو مشخص می‌شود، که حاصل از قوانین مختلف فشارسنجی است و برای مؤلفه‌های مختلف مولکولی به‌شدت متفاوت هستند [۴]. یون‌سپهر نسبت به سیگنال‌های سامانهٔ موقعیت‌یابی جهانی، یک محیط پراکنده است یعنی امواج با بسامدهای مختلف تأخیر و تقدم فازهای متفاوتی دارند. میزان این تأخیر، وابسته به مقدار محتوای کلی الکترونی لایهٔ یون‌سپهری TEC است که با زمان تغییر می‌کند. محتوای چگالی الکترون یک مقدار توصیفی مهم برای یون‌سپهر است [۵]. TEC مجموعه الکترون‌های موجود در استوانه‌ای با سطح مقطع یک مترمربع است که در مسیر ماهواره تا گیرنده محاسبه می‌شود. TEC در تعیین تأخیر فاز امواج رادیویی اهمیت زیادی دارد و به‌شدت تحت تأثیر فعالیت خورشیدی می‌باشد.

محتوای کلی الکترون یکی از پارامترهای یون‌سپهری است که زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و مقدار آن برابر است با تعداد الکترون‌هایی که در یک ستون با مقطع عرضی یک متر مربع، که از زمین به سمت بالا و از میان یون‌سپهر عبور می‌کند، و از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید که در آن N_e نشان دهندهٔ توزیع چگالی الکترون و واحد آن TECU است.

$$TEC = \int N_e ds \qquad (۱)$$

$1\ TECU = 10^{16} e/m2$ می‌باشد.

TEC به‌تنهایی قادر به توصیف کامل یونیزاسیون در یون‌سپهر نیست اما می‌توان برای کاربردهای خاص انتشار امواج رادیویی از آن استفاده کرد. کاربران تک بسامده سامانهٔ تعیین موقعیت جهانی (GPS)، می‌توانند مشاهدات TEC را برای تصحیح سیگنال

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

به‌کار گیرند، چون که TEC متناسب با تأخیر سیگنال رادیویی در یون‌سپهر است [۶].

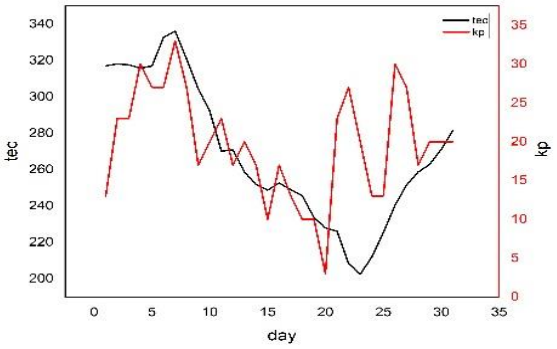
روش تحقیق

در این پژوهش به مقایسهٔ طوفان‌های مغناطیسی و تابش‌های کیهانی کهکشانی با محتوای کلی الکترون یون‌سپهر، به‌دلیل شرایط آرام و نبود طوفان‌های مغناطیسی شدید در ماه ژانویهٔ سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۵ پرداخته شده است. داده های مربوط به TEC از سایت GNSS-TEC استخراج و از میانگین روزانه آن در این پژوهش استفاده شده است.

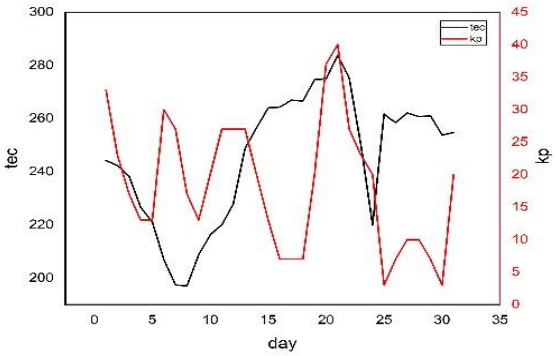
داده‌های مربوط به Kp نیز به‌صورت میانگین روزانه از سایت omniweb به‌دست آمده است.

شاخص صحیح سه ساعته K به‌عنوان اندازه‌ای از دامنه بی‌نظمی و سرعت فعالیت مغناطیسی زمان طوفان مغناطیسی معرفی می‌شود. شاخص Kp به‌عنوان یک شاخص سیاره‌ای معرفی شده است و با میانگین‌گیری از شاخص K حاصل از ۱۳ رصدخانه تحت عرض‌های شفق قطبی به‌دست می‌آید. فعالیت‌های مغناطیسی مقیاس سیاره‌ای به‌وسیله شاخص Kp اندازه‌گیری می‌شود. مقادیر Kp بیشتر از ۴ نشان‌دهندهٔ وقوع طوفان ژئومغناطیسی است که وابسته به مقدار آن، درجهٔ فعالیت طوفان نیز متفاوت خواهد بود در این پژوهش همه مقادیر kp در عدد ۱۰ ضرب شده است. تابش‌های خورشیدی در یک دوره ۲۲ ساله (دو دوره ۱۱ ساله خورشیدی) در نظر گرفته شده است. در برخی از دوره‌ها فعالیت‌های خورشیدی شدیدتر، در برخی دیگر در مقایسه با سایرین این فعالیت‌ها طولانی‌تر و در برخی دوره‌ها نیز میزان فعالیت خورشیدی و به‌تبع آن تعداد لکه‌های خورشیدی بسیار کاهش‌یافته است. معمولاً دورهٔ ۱۱ ساله دوم شدیدتر از دورهٔ ۱۱ ساله اول بوده و دارای تعداد لکه‌های بیشتری است [۶].

داده‌های مربوط به تابش‌های کیهانی کهکشانی، به‌صورت میانگین روزانه از سایت OULU بدست آمده است.

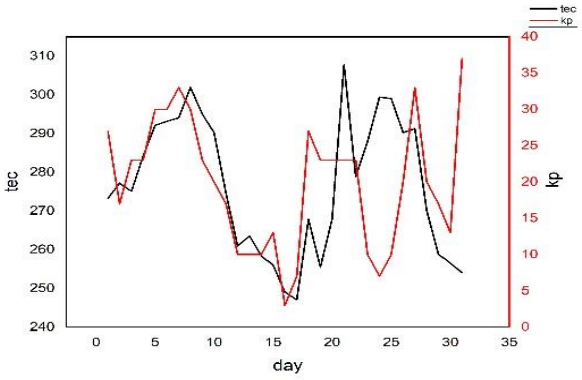


شکل ۱: مقایسهٔ شاخص kp و TEC در ماه ژانویهٔ ۲۰۱۵



شکل ۲: مقایسهٔ شاخص kp و TEC در ماه ژانویه ۲۰۱۶

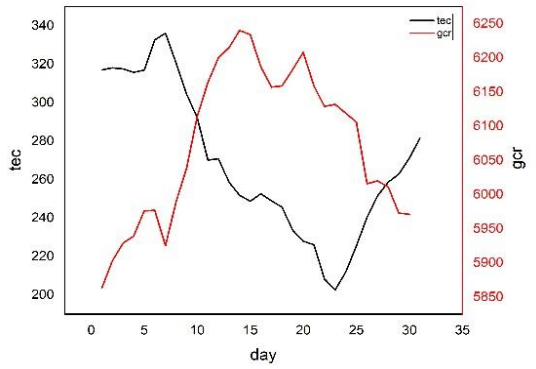
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]



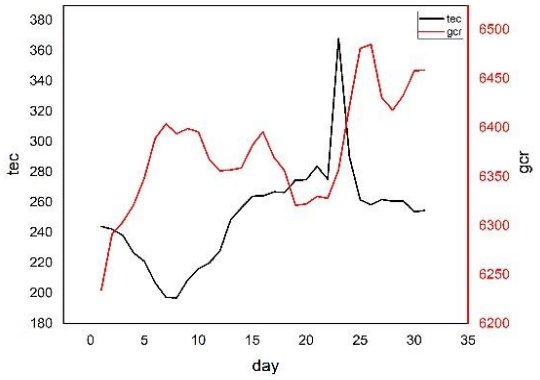
شکل ۳: مقایسهٔ شاخص kp و TEC در ماه ژانویهٔ ۲۰۱۷

بحث و نتیجه‌گیری

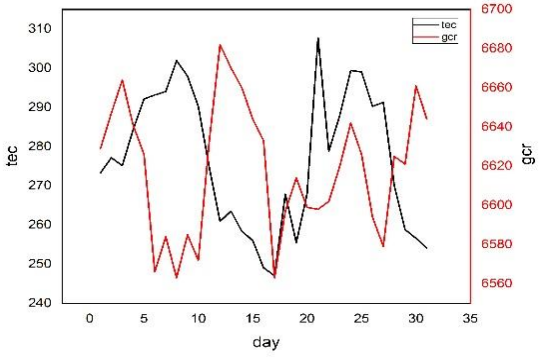
متداول‌ترین شاخص‌هایی که برای اندازه‌گیری فعالیت‌های خورشیدی استفاده می‌شوند، شاخص طوفان‌های مغناطیسی kp هستند. نتایج مقایسهٔ شاخص طوفان های مغناطیسی با محتوای کلی الکترون در ماه ژانویهٔ سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ به‌ترتیب در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. در هر سه شکل محورهای سمت راست نشان دهنده شاخص kp و محورهای سمت چپ مربوط به شاخص TEC می‌باشد که به‌ترتیب با رنگ‌های قرمز و مشکی مشخص شده است. همچنین در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ به مقایسهٔ تابش‌های کیهانی کهکشانی و محتوای کلی الکترون در همان زمان یعنی ماه ژانویهٔ سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ پرداخته شده است که محورهای سمت راست مربوط به GCR و محورهای سمت چپ مربوط به TEC می‌باشد و به‌ترتیب با رنگ‌های قرمز و مشکی نشان داده شده‌اند.



شکل ۴: مقایسهٔ GCR و TEC در ماه ژانویهٔ ۲۰۱۵



شکل ۵: مقایسهٔ GCR و TEC در ماه ژانویهٔ ۲۰۱۶



نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های خورشیدی با محتوای کلی الکترون رابطه مستقیم و با تابش‌های کیهانی کهکشانی رابطه عکس دارد. شکل‌های ۱، ۲ و ۳ نشان‌دهندهٔ ارتباطی مستقیم بین شاخص kp با

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

محتوای کلی الکترون می‌باشد که دارای میانگین ضریب همبستگی ۴۶/. می‌باشند. و این در حالی است که مقایسهٔ نمودارهای موجود در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ رابطه‌ای غیر مستقیم بین تابش‌های کیهانی کهکشانی و TEC را با ضریب همبستگی ۰/۷۹- نشان می‌دهند. در این مقاله به‌صورت میانگین این مقایسه انجام شده است.

مرجع‌ها

[۱] Labitzke, K., 2005. On the solar cycle–QBO relationship: a summary. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 67(1-2), pp.45-54

[۲] Ahluwalia, H.S., 2017. Galactic cosmic rays, TSI, sunspots, and Earth surface air temperature. Indian Journal of Radio & Space Physics (IJRSP), ۴۳(۲), pp.141-150.

[۳] Avakyan, S.V., 2013. The role of solar activity in global warming. Herald of the Russian Academy of Sciences, 83(3), pp.275-285

[۴] rikan F., Erol C.B., Arikan O., "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data," Journal of Geophysical Research: Space Physics, 108(A12), ۲۰۰۳, doi: 10.1029/2002JA009605..

[۵] Misra, P., Enge, P., Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance. United States of America, 2012

[۶]., Arikan F., Arikan O., Ugurlu O., Sadeghimorad A., "Online, automatic, near-real time estimation of GPS-TEC: IONOLABTEC," Space Weather, 11(5), ۲۹۷-۳۰۵., ۲۰۱۳, doi: 10.1002/swe.20054.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]